

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289139

研究課題名(和文)歪みを可視化するオパール結晶薄膜と社会インフラの検査技術への応用

研究課題名(英文) Opal crystal film for strain imaging and its application of inspection technology in infrastructure

研究代表者

不動寺 浩(Hiroshi, Fudouzi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー

研究者番号：20354160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：簡便で低コストの社会インフラのヘルスマニタリング技術のため歪み可視化シートの実用化研究を進めている。このプロジェクトでは、A3サイズのコロイド結晶薄膜をPETプラスチックシート上に大面積に形成することに成功しました。また、UV照射による損傷からオパール薄膜を保護するコーティング層を形成する技術を開発しました。実際の現場利用を想定し、ファー・フィールド(20m以上の遠方から)の歪み分布可視化技術を開発した。一方、既存の歪みゲージをリファレンスとし、歪み可視化シートの回折ピークと歪み量に線形関係があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We have been studying on practical application of strain imaging sheet for simple and low cost social infrastructure health monitoring technology. In this project, we have succeeded in forming a large area of A3 size of colloidal crystal thin film on PET plastic sheet. We also developed a technique to form a coating layer that protects opal thin films from UV irradiation damage. For a practical field use, a strain imaging technology of far field (from a distance of over 20 m) was demonstrated. On the other hand, using the conventional strain gauge as a reference, it was found that there is a linear relationship between the peak shift of strain imaging sheet and measured strain gauge.

研究分野：材料化学

キーワード：コロイド結晶 構造色 歪み可視化 歪みゲージ モニタリング オパール結晶薄膜 社会インフラ  
紫外線劣化

## 1. 研究開始当初の背景

我が国では高度経済成長期に大量の社会インフラが整備され、これから本格的な高齢化時代を迎える。土木構造物（橋梁、トンネル）及び建築物（住宅、ビル）が地震や長期間の応力負荷によって生じる局所的な塑性変形を可視化できれば、革新的な社会インフラのヘルスマonitoring技術として、低コストで安全・安心な社会を実現することが可能となる。

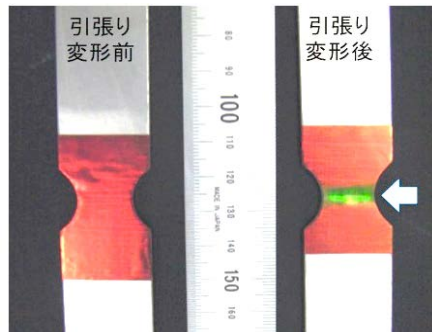


図1 アルミ試験片の塑性変形領域の変色

物質・材料研究機構で構造色に変化する人工オパール薄膜が開発され、塑性変形による歪みを構造色変化として可視化する技術への応用が進められてきた。この新材料はコロイド結晶をベースとしており、図1に示されるよう、引張試験で変形した領域が色変化することで歪みを容易に視認することができる。

研究代表者らはこの新材料を社会インフラのヘルスマonitoring技術へ展開するため、図2に示すような異分野融合の共同研究チームを組織し、材料設計、評価・計測、実装技術などの要素技術の開発に取り組んだ。

具体的には実証研究を実施するのに必要となる、①耐環境性に優れたオパール薄膜の開発、②歪み計測技術の開発、③ファーフイルドの歪み分布可視化技術の3項目の要素技術を役割分担して実施することになった。

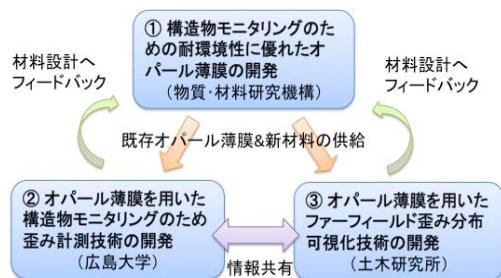


図2 研究体制（3機関の研究分担）

## 2. 研究の目的

ボトムアップ・ナノテクノロジーを応用して創製された革新的な新材料（歪みを構造色変化として可視化）を低コストで社会インフラのヘルスマonitoringを可能とする新技術を確立することが本研究の目標である。

耐環境性に優れたオパール薄膜の開発は研究代表者（物材機構）らによって実施した。

オパール薄膜の大面积化（15cm×10cm）及び均一で均質な成膜条件の最適化、さらにその評価を迅速に行うための薄膜評価システムを開発する。また、オパール薄膜の大面积化の目標としてA3サイズの成膜を目指した。

実際の現場で使用する際、施工法と実環境下で劣化の生じない耐環境性の優れたオパール薄膜が必要となる。施工についてはコンクリート構造物への貼り付けを目指した。一方、耐久性については計画時に想定していた非極性溶媒の問題より紫外線による劣化が問題であることが判った。暴露試験を行いながらオパール薄膜の耐久性の向上を目的とした。

社会インフラに施工されたシートを離れた場所から観察に必要なファーフイルド歪み分布可視化技術の開発は土木研究所の研究分担者が中心になった。

オパール薄膜を貼り付けた試験片はひずみによって色変化し、分光器を用いて計測できる反射波長として定量的にひずみの値と対応を取ることができている。波長変化を面的に取得することでひずみ分布の可視化へとつながることが期待できる。透過する波長範囲（±10 nm）を1 nm ずつ制御できる液晶チューナブルフィルターを介した計測用デジタルカメラを用いて画像計測することで色分布を光子数として整理し、曲げ試験中のひずみと対応させることでひずみの分布像として解析する方法の開発を目指した。

また、研究協力者（物材機構）によって開発されたイメージングアプリ（図3: 名称 Hizmiel Android 版, iOS 版）を利用した。このアプリは健常部の色を任意に設定し、それ以外の色を透明化できる。このアプリとの比較を検討した。また、トンネルや橋梁のひずみ計測法を想定した遠方からの観察がどの程度可能であるかを望遠レンズと液晶チューナブルフィルターを組み合わせる新技術開発を目標とした。



図3 画像抽出処理アプリによる観察

歪みゲージのような構造物モニタリングを定量評価するための歪み計測に関する技術開発は広島大学の研究分担者が担当した。オパール薄膜のピーク波長の計測を行い、ピーク波長とひずみ（ひずみの和）の間に線形関係がなりたつことを理論的にも実験的にも実証する。また、現場でのひずみ計測技術に要求

されるひずみ計測感度を検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) オパール薄膜のスケールアップと評価

オパール薄膜は図4に示す縦型の成膜装置を用いて作製した。本研究ではオパール薄膜の大型化を目指しており写真Aの既存装置をスケールアップした写真B (A3サイズ対応)の成膜装置を使用した。

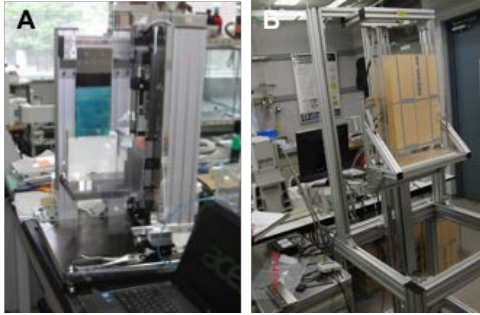


図4 大面積オパール薄膜の成膜装置

オパール薄膜の評価のため反射スペクトルの回折波長を評価指針とした。図5にシステムの写真と原理を示す。ファイバー分光器(Ocean Optics USB2000+)で反射スペクトルを計測する。シートはXYステージによってあらかじめPCのプログラムで測定位置をプログラムされている。このシステムを使用することでオパール薄膜の20cm×20cm領域の反射スペクトルを自動計測する。さらに、測定した反射スペクトルを解析しピーク波長位置を自動抽出する。XY座標と回折波長をリンクできる独自の計測システムを開発した。

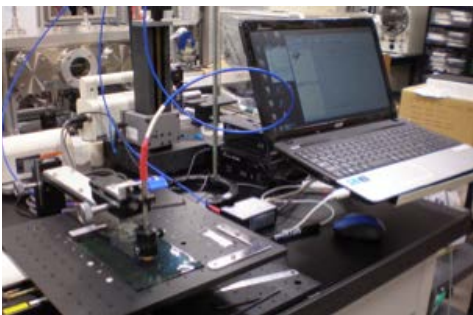


図5 オパール薄膜の結晶性評価装置

#### (2) ファーフィールド歪み分布可視化技術

面分光システムを用いた色分布の評価とファーフィールド計測の検討を行った。初期ピーク波長600nmのオパール薄膜を用いた。ハサミで任意の形状に切り抜き、土木用エポキシ接着剤を用いて角柱試験片(SS400あるいはSUS, 10×10×200mm)の側面中央に10×50mmのオパール薄膜を接着した。全ての試験片は支点間距離140mmの条件下で三点曲げ試験に供した。AndroidスマートフォンにHizmielをインストールし、同端末に搭載されているカメラで試験片を撮影した(図3)。

計測用 CCD カメラとして 16-bit CCD カメラ(Apogee, F260, 512×512 pixel, 50 mm レンズ, F 値 1.4)を万能試験機から 1.5 m の位置に光学定盤で固定し、白色 LED の照明でオパール薄膜を照射した状態で計測した。CCD カメラ計測時の透過波長は 550-620 nm±5 nm とした。また、ファイバー分光器(Ocean Optics USB4000)を用い、任意の箇所の反射波長も計測した。

遠方からの計測時にフィルターがどの程度寄与できるのかを確認するためにファーフィールド試験として光学定盤にカメラ、レンズ、液晶チューナブルフィルタを固定して 10 m, 20 m, 30 m, 40 m 遠方にひび割れを導入することで色変化を施したコンクリート板を設置して観測した。実験棟廊下の蛍光灯と窓からの自然光下で計測し、特別な照明は用いていない。

#### (3) 歪み計測技術の開発

従来、構造物に発生しているひずみの計測・評価には、ひずみゲージが用いられている。したがって、オパール薄膜で計測されるピーク波長が、ひずみゲージで計測されるひずみの値とどのような関係にあるか明らかにすることは、今後、現場でオパール薄膜が使用されることを想定した上での測定が重要となる。そこで、引張試験、四点曲げ試験を実施し、オパール薄膜で計測されるピーク波長とひずみの関係について検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) オパール薄膜の大面積化と紫外線に対する耐久性向上

図4Bの成膜装置を使ってA3サイズのオパール薄膜をシート上に成膜することができた。このオパール薄膜を後処理(規則配列したポリスチレン粒子の隙間をシリコンエラストマーで充填、さらに粒子間隔を拡大)し、歪み可視化シートを作製した。図6に示すような歪み可視化シート成膜技術を開発した。

図6の写真Aは歪み可視化シートであり、約5μmの膜厚のオパール薄膜が厚さ50μmの黒色ポリエチレンテレフタレート(PET, 東レレミラーX30)に成膜されている。

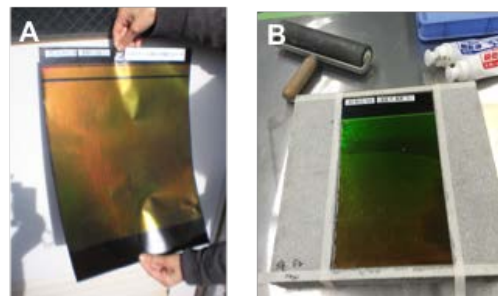


図6 A3サイズの歪み可視化シートとコンクリート板へのエポキシ系接着剤での貼り付け



研究協力者（ショーボンド建設）と協働で PET シートを同社製の低粘度エポキシ系の接着剤（VE プライマー）でコンクリート平板へ貼り付けた（図 6、写真 B）。シートは 20°C 環境下で約 1 か月養生後に単軸垂直引張試験で付着強さを測定したところ付着強さは 3.8 N/mm<sup>2</sup> であった。コンクリートへのシート施工に問題ないことが確認された。

歪み可視化シートの品質評価についても検討した。図 5 の測定装置を用いて 90 mm × 160mm 領域を 10mm 間隔の正方格子の測定箇所 144 点の反射スペクトルを自動計測した。

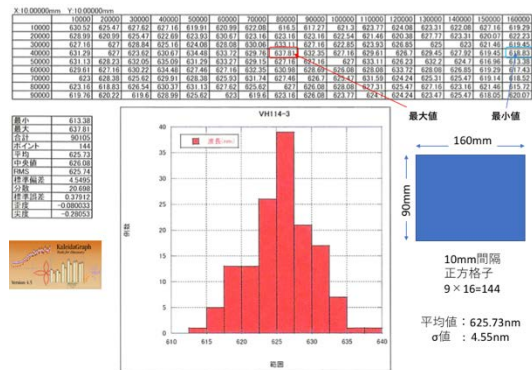


図 7 歪み可視化シートの結晶性評価

図 7 は歪み可視化シートの結晶性評価の指針の一例である。この方法では反射スペクトルから回折波長を抽出し、測定場所別のばらつき状態を解析することができる。具体的には Excel データをデータ解析プログラム（KaleidaGraph）で処理しヒストグラフを得た。なお、図 7 では反射ピークの回折波長の平均値は 625.7nm で  $\sigma$  値は 4.6nm だった。歪み可視化シートの結晶性を評価する指針になる。

土木研究所の研究分担者と共にオパール薄膜の耐久性評価のためウェザーメータで促進耐候性試験を行った。これは紫外線に対するオパール薄膜の劣化評価を目的とした。

耐久試験(ウェザーメーターテスト)

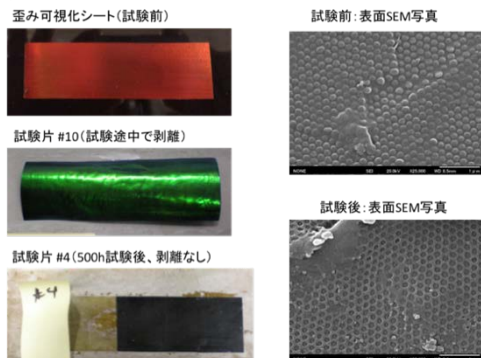


図 8 オパール薄膜の紫外線照射による劣化

歪み可視化シートは初期状態で赤色であったのが紫外線照射によって緑色、最終的には

無色（下地の黒 PET シート）に変色した。図 8 の左側の 3 枚の写真に相当する。この変色は走査電子顕微鏡によるマイクロ構造の観察からコロイド粒子（ポリスチレン）が消失しているのが原因であることが分かった。そこでオパール薄膜の紫外線による劣化抑制のため紫外線吸収剤を含有する表面被覆材による保護層を形成することにした。

水系シリコーンの被覆材（ショーボンドマテリアル社、PVM クリアトップ）を選定した。溶媒として EtOH を 1:1 で希釈が良好な塗膜が形成できることが分かった。次に被覆材が紫外線によるオパール薄膜の劣化抑制に効果があることを検証した。図 9 は物材機構（つくば市）の暴露試験施設で南方に試験片を設置し太陽光からの紫外線による劣化を評価した。評価方法として反射スペクトルを計測し回折ピークの経時変化を測定した。回折波長は初期値で規格化しており、被覆材の膜厚は塗工回数で制御している。被覆材がない（コート無し）では波長位置が日数の経過と共に低下しており紫外線による劣化の様子が観測された。一方、被覆材ありの場合についても塗工数が 1 回の被覆より 3 回、5 回と膜厚が大きいほど劣化抑制に効果があった。

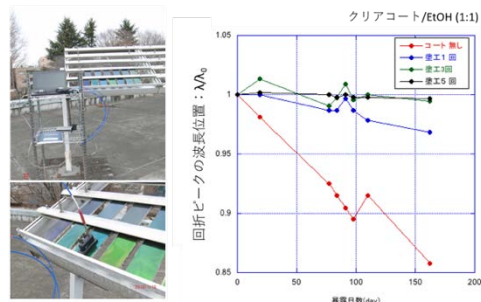


図 9 暴露試験による紫外線劣化の測定

(2) 面分光システムを用いた構造色分布の評価とファーフールド計測の検討

研究分担機関（土木研究所）にて三点曲げ試験を実施し、試験片を全面降伏させた。荷重を開放した状態で、Hizmiel によるアプリ計測で得られた画像を図 10 に示した（上：オリジナル像、下：アプリ処理像）。アプリ計測では健全部の色を基準に設定したところ、圧縮側と引張側それぞれが透明化（白色表示）して表示された。これは撮影された画

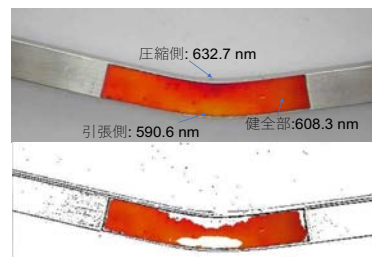


図 10 Hizmiel による画像処理

像の中で引張側及び圧縮側それぞれが健全部から色変化していることを感度高く捉えていることを意味する。オリジナル像の数値はそれぞれの領域でのファイバー分光器による回折波長であり、健全部の波長 608.3nm が圧縮側で 632.7nm へ引張側で 590.6nm へと反対方向への波長シフトを確認している。

社会インフラの現場では、対象にアクセスすることが困難で離れた場所からの観察及び計測が必要となることが多い。例えば、一般的なトンネルの高さ方向の目安として 10 m 程度、また、川岸からの橋梁点検の目安として 20 m 程度と言われている。離れた距離から計測するファーフールド試験を行った。観測に用いた供試体を図 11 に示す。事前にひび割れを形成しており赤色から緑色に変色している。観察には液晶チューナブルフィルター (CRI 社製 VariSpec) と望遠レンズを CCD カメラに接続した。図 12 に建物内部で実施されたファーフールド計測の結果を示す。

CCD カメラに中望遠レンズを用いた。供試体を 10m から 40m まで離れた状態の観察結果を示す。画像処理された左側の像より 40m 離れた状態でもひび割れの変色部を識別できた。一方、スマートフォンの拡大画像では 20m が限界であった。望遠レンズを使用することで、ファーフールド条件でもひび割れの構造色の違いを認識することは可能である。

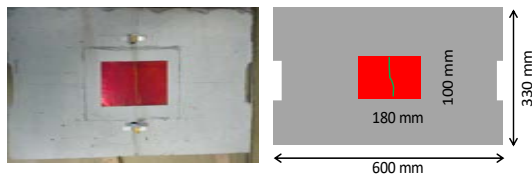


図 11 ひび割れの変色部を可視化した供試体 (左: デジタルカメラ写真、右: モデル図)

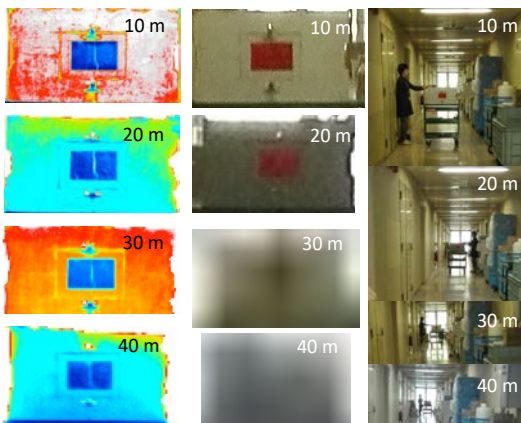


図 12 ファーフールド観察 (左: 液晶チューナブルフィルター、中: スマートフォン拡大像、右: スマートフォン通常)

(3) ピーク波長とひずみ評価  
研究分担機関 (広島大学) にて歪みゲージ

との比較による歪み可視化シートの定量評価を行った。初期ピーク波長 510nm を有するオパール薄膜を用いて引張試験を実施した。実験装置の構成を図 13(上)に示す。オパール薄膜の基板にはポリ塩化ビニル(PVC)を使用し、荷重負荷には島津製作所製 Autograph を使用した。図 13(下)はその様子を示す。ピーク波長と歪み評価のため、ピーク波長計測にはファイバー分光器(Ocean Photonics, USB2000)、ひずみ計測には三軸ひずみゲージを使用した。

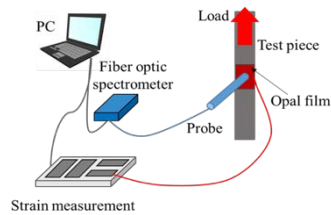
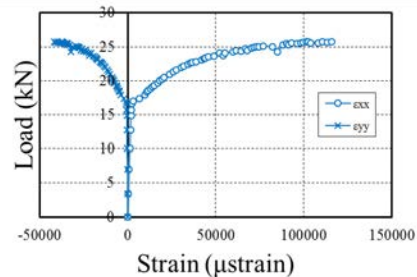


図 13 引張試験の装置構成

(a) 荷重-ひずみ曲線



(b) ピーク波長-ひずみ曲線

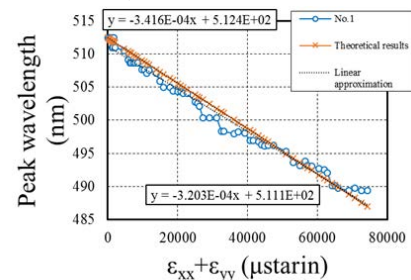


図 14 引っ張り試験の測定データ

図 14 に引っ張り試験の結果を示す。(a)は荷重-ひずみ曲線、(b)はピーク波長-ひずみの第一不変量 (ひずみの代表値) の相関を示している。引っ張りひずみの増加に伴いピーク波長が減少し、ひずみの代表値とピーク波長の間に線形関係があることが確認された。この結果から歪みゲージと同様、分光スペクトルからひずみ量を計測することが可能である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- (1) 大屋貴生, 三村典正, 百武 壮, 土谷浩一, 不動寺造, ひび割れを可視化する先進機能材料シートの実装化へ向けての検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, **17**, pp. 641-646, 2017.
- (2) 不動寺造, 光学フィルムに関するバイオミメティクス, 成形加工, 査読無, **29**, pp. 87-90, 2017.
- (3) H. Fudouzi, K. Tsuchiya, S. Todoroki, T. Hyakutake, H. Nitta, I. Nishizaki, Y. Tanaka, T. Ohya, Smart photonic coating for civil engineering field: for a future inspection technology on concrete bridge, *Proc. SPIE*, 査読有, 10168, pp. 1-6, 2017.
- (4) 不動寺造, 人工オパール薄膜によるスマート材料, *科学と工業*, 査読無, **90**, 252-259, 2016.
- (5) 百武 壮, 西崎 到, 道信剛志, ひび割れを光検出する塗料と構造物劣化検出, *土木技術資料*, 査読無, **57**, pp. 30-33, 2016.
- (6) 不動寺造, 構造色が変化する材料とセンシングへの応用, *OHM*, 査読無, **102**, pp. 30-31, 2015.

〔学会発表〕(計 17 件)

- (1) 百武 壮, 歪みを可視化するオパール結晶薄膜と社会インフラの検査技術への応用, 日本化学会第98春季年会 ATP, 2018.
- (2) 百武 壮, 新田 弘之, 不動寺 浩, 轟 眞市, オパール薄膜を用いた構造物のひび割れ可視化技術, 日本道路協会 第32回日本道路会議, 2017.
- (3) 松永直人, 田中義和, 不動寺造, 百武 壮, オパール薄膜を用いたはりの曲げひずみ測定について, 日本非破壊検査協会 秋季講演大会, 2017.
- (4) 百武 壮, 西崎 到, 新田弘之, 不動寺 浩, 轟 眞市, 田中義和, ひずみやひび割れを視覚化するシート材料を用いた計測システムの検討, 土木学会 第72回年次学術講演会, 2017.
- (5) T. Hyakutake, I. Nishizaki, H. Nitta, H. Fudouzi, Y. Tanaka, Crack and strain visualization for infrastructure maintenance using smart opal film, Fifth International Symposium Frontiers in Polymer Science, 2017.
- (6) 不動寺 浩, コロイドフォトニック結晶薄膜の構造色を利用した構造材料の歪み可視化技術, 日本材料学会 第186回コンクリート工事前樹脂部門委員会, 2016.
- (7) 田中義和, 不動寺 浩, 百武 壮, ひずみ測定のためのオパール薄膜の開発, 日本非破壊検査協会秋季講演大会, 2016.
- (8) H. Fudouzi, Opal Photonic Crystal Films as Smart Materials for Sensing Applications, *Advanced Architectures in Photonics*, 2014.
- (9) T. Hyakutake, I. Nishizaki, H. Fudouzi, T. Sawada, Y. Tanaka, I. Ario, 2D Visualization of Strain Deformation and Crack Using Tunable Structural Color Coating, The 15th IUMRS-International Conference in Asia, 2014.

〔図書〕(計 2 件)

- (1) 不動寺造, コロイド結晶薄膜の形成とその機能発現, 高分子微粒子ハンドブック (監修: 藤本啓二), シーエムシー出版, pp218-229, 2017.
- (2) H. Fudouzi, Colloidal photonic crystal films: fabrication and tunable structural color and applications, in "Nanomaterials and Nanoarchitectures" (M. Bardosova, T. Wagner, *Eds.*), Springer, pp1-19, 2015.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: コロイド結晶膜を製造する方法およびその装置

発明者: 不動寺造, 加藤一郎, 澤田 勉

権利者: 国立研究開発法人物質・材料研究機構 理事長

種類: 特許

番号: 2014-126044

出願年月日: 2014年6月19日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

○IoT 技術による歪み可視化シートの屋外遠隔モニタリング, 公開 2017年9月1日

<http://www.nims.go.jp/KO-ZO/news/20170831.html>

○社会インフラの老朽化を救う, 森の宝石タマムシの翅の秘密

考えるメディア, 公開 2015年9月11日

<https://media.style.co.jp/2015/09/2641/>

○“歪み可視化シート”の記事掲載

日刊工業新聞 2015年3月17日朝刊

○歪み可視化シート: 構造材料の簡易検査

[https://samurai.nims.go.jp/profiles/fudouzi\\_hiroshi.pdf](https://samurai.nims.go.jp/profiles/fudouzi_hiroshi.pdf)

国際共同研究

○米国・University of Washington (2014-)

○カナダ・Canadian Nuclear Laboratories (2017-)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

不動寺 浩 (Hiroshi Fudouzi)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・グループリーダー  
研究者番号: 20354160

(2)研究分担者

田中 義和 (Yoshikazu Tanaka)  
広島大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 00335704

百武 壮 (Tsuyoshi Hyakutake)

国立研究開発法人土木研究所・先端材料資源開発センター・主任研究員  
研究者番号: 30468871

(3)研究協力者

轟 眞市 (Shin-ichi Todoroki)  
国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員

澤田 勉 (Tsutomu Sawada)

国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・外来研究員

大屋貴生 (Takao Ohya)

ショーボンド建設・補修工学研究所・研究員